

Sistema Automático de Inducción de Transitorios en Dispositivos Electrónicos por medio de un Laser Pulsado

I. López-Calle, J. G. Izquierdo, F. J. Franco y J. A. Agapito

Abstract— En este artículo, se describe un sistema que permite emular por medio de un láser los transitorios que pueden producir los rayos cósmicos en los componentes electrónicos. En particular, el sistema está adaptado para examinar componentes analógicos. Este sistema controla un osciloscopio digital conectado a la salida del dispositivo, que sitúa el láser en un punto específico del circuito integrado, y que almacena el transitorio observado en el dispositivo para realizar un posterior estudio estadístico.

Este sistema ha sido utilizado para conocer los transitorios que pueden aparecer en un amplificador operacional (LM124) y un comparador de tensión (LM111).

Index Terms— Láser, sucesos aislados, vehículos espaciales.

I. INTRODUCCIÓN

LOS sistemas electrónicos embarcados en vehículos espaciales como satélites, transbordadores, etc. están sujetos a la acción perniciosa de iones energéticos, procedentes del viento solar, del centro de la galaxia, etc. Estos rayos cósmicos pueden golpear nudos sensibles de los circuitos integrados de tal modo que, al ionizar el silicio a lo largo de su trayectoria, se crea carga libre que equivale a un pulso de corriente en el nudo. En el caso de los dispositivos analógicos, este pulso de corriente produce un transitorio en la salida del componente que puede poner en riesgo la misión tal y como se ha observado en diversas misiones espaciales [1-4].

En consecuencia, es obligatorio evaluar la tolerancia de este tipo de dispositivos al paso de iones antes de proponer el uso de un componente en detrimento de otros similares. Una opción consiste en la irradiación de los componentes electrónicos en aceleradores lineales que, sin embargo, son pocos, muy caros y con poca disponibilidad. Por ello, el uso de láseres pulsados ha adquirido importancia en los últimos años,

presentándose el reto de diseñar sistemas automáticos capaces de caracterizar de forma automática los componentes.

En la actualidad, solo existen unas cuantas instalaciones asentadas en el mundo que disponen de un sistema de test de componentes: Dos en Francia (Burdeos [5], París), una en Reino Unido y otras dos en los Estados Unidos de América. En este artículo, se describirá el sistema automático de control de una de las primeras instalaciones de este tipo que se están desarrollando en España.

II. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL

A. Esbozo del sistema completo

Fig. 1 muestra una descripción gráfica del sistema láser de irradiación. Una vez desencapsulado el dispositivo y montado en una placa de circuito impreso, la placa se coloca en un portamuestras motorizado en los tres ejes de movimiento XYZ con una precisión de 0,1 μm en su movimiento. El haz láser, con una anchura de pulso de 60 fs y repetidos cada milisegundo, se focaliza mediante un objetivo de microscopio de larga distancia de trabajo y de 50X aumentos con el que se obtiene un diámetro de "spot" del orden de 1 a 1,5 μm en función de la longitud de onda utilizada. Una cámara CCD permite observar el correcto emplazamiento del punto de disparo.

La salida eléctrica del circuito se conecta a un osciloscopio digital mediante una sonda de 8 pF y la captura de datos en el osciloscopio se dispara mediante una señal externa sincronizada con el pulso láser. La toma de datos y el control de la instrumentación se realiza mediante una aplicación específica programada en Labview y bajo los protocolos de comunicación GPIB o USB dependiendo del instrumento que controlar.

Toda la instrumentación que se ha utilizado viene descrita en la Tabla 1 con sus características principales.

B. Datos sobre el láser utilizado

Para realizar los experimentos, se utilizó un láser de Titanio-Zafiro ($\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$) como semilla seguido por un amplificador regenerativo. Por su particular configuración, la longitud de onda del láser puede ser fijada manualmente antes de iniciar los experimentos.

Manuscrito recibido el 5 de Mayo de 2011. Este trabajo fue financiado por el MCINN a través de los proyectos AYA2009-13300-C03-03 y Consolider SAUUL CSD2007-00013, y por el convenio UCM-BSCH.

Isabel López-Calle, Francisco J. Franco y Juan A. Agapito pertenecen al Departamento de Física Aplicada III, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid (UCM), 28040 Madrid (España) (e-mail: isabelcalle, monti, agapito@fis.ucm.es).

Jesús G. Izquierdo pertenece al Servicio de Espectroscopía Multifotónica y de Femtosegundo, CAI de Espectroscopía, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid (UCM), 28040 Madrid (España) (e-mail: jegonzal@quim.ucm.es).

Tabla 1. Características principales de la instrumentación integrada en el sistema laser

INSTRUMENTACIÓN	DESCRIPCIÓN	DISTRIBUIDOR	CARACTERÍSTICAS
Osciloscopio	Digital Phosphor Oscilloscopes TDS3052C	Tektronix	Ancho de Banda 500 Mhz. Buffer 10k puntos.
Motores de Movimiento	Precision Motorized Actuators LTA-HS	Newport	Resolución : 0.035 μm Incremento Mínimo: 0.1 μm Repetitividad unidireccional: 0.5 μm , bidireccional: 2 μm
Controlador Motores	3 Axis Motion Controller/Driver ESP300	Newport	Procesador DSP de 32 bits para control sincronizado de alta precisión.
Objetivo Microscopio	Mitutoyo M Plan APO NIR 50X Infinity Corrected	Edmun Optics	Distancia de Trabajo: 17 mm (Larga distancia de trabajo)
Detector Energía	Power Detector 918D-IR	Newport	Rango Espectral: 0.78-1.8 μm
Medidor Energía	1918-C	Newport	Potencia: 11pW-20kW
Detector Energía	ET-3040	Electro-Optics Technology (EOT)	Fotodiodo PIN de InGaAs para infrarrojo.
Cámara CCD	Sony XC-ST50	RS	Optimizada para visible e infrarrojo.
Atenuadores	NDC-100S-4M NDC-25C-2	Thorlabs	Filtro de 8 pasos de transmisión variable y continua.

El láser emite un pulso por milisegundo de tal modo que la lógica aneja al láser produce un pulso digital de disparo que sirve de disparo para la instrumentación situada en el exterior.

C. Ordenador Personal, protocolos de comunicación y sincronización del barrido

Todo el sistema está controlado por un ordenador personal bajo el sistema operativo Vista en el que se ejecuta un programa de control desarrollado en LABVIEW, ampliamente utilizado en la industria y laboratorios de investigación. Este programa gobierna a todos los componentes mencionados anteriormente a través de una tarjeta GPIB basada en el protocolo IEEE-488.2, que permite la transmisión de mensajes entre componentes de una forma efectiva y rápida.

Fig. 2 muestra la interfaz de usuario de una versión de este programa. Esta pantalla está formada por tres módulos principales de configuración: A, B, C y un gráfico de forma de onda en el que se visualiza en línea la salida del dispositivo analógico que caracterizar.

En el módulo A se selecciona el puerto de entrada al ordenador personal y la ruta del archivo donde se almacenan los datos provenientes del osciloscopio para su posterior tratamiento y análisis. En el módulo B se seleccionan los parámetros de configuración del osciloscopio así como el disparo para el inicio de la captura de datos. En el módulo C, en función del dimensionado del dispositivo a irradiar, se

configura el número de disparos y la distancia entre los mismos para realizar el barrido del área seleccionada.

Así, con la configuración que aparece en el ejemplo (Fig. 2), obtendríamos una superficie de barrido XY de 70x60 pasos de 10 μm cada uno con lo que deben examinarse un total de 4200 posiciones de disparo. En cada una de estas posiciones se almacena una señal que consta de 10.000 puntos. Como se observa, la cantidad de datos almacenada es muy grande, los archivos de salida ocupan aproximadamente 1GB de memoria, y el tratamiento de los mismos debe ser realizado de una forma rápida y eficiente puesto que, en muchos casos, la onda registrada no muestra transitorio.

Si bien la posición del foco del haz queda fijada para cada barrido, ya sea en la superficie o en el interior del dispositivo, el barrido completo de toda la superficie se realiza siguiendo el diagrama de estados reflejado descrito en Fig. 3.

La duración de la caracterización completa del dispositivo es función de las dimensiones del barrido. El posicionado y captura de datos en cada punto de disparo dura en torno a 1.5 s. A este tiempo hay que añadirle lo que tarda en posicionarse en la nueva coordenada y, cuando ya se ha realizado un barrido completo en la coordenada x. Esta duración es dependiente del número de disparos en la coordenada x y se estima en torno a unos 2 s ya que el programa también introduce intervalos de espera para que no se solapen las

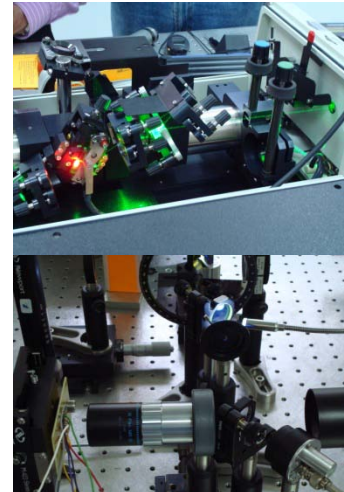
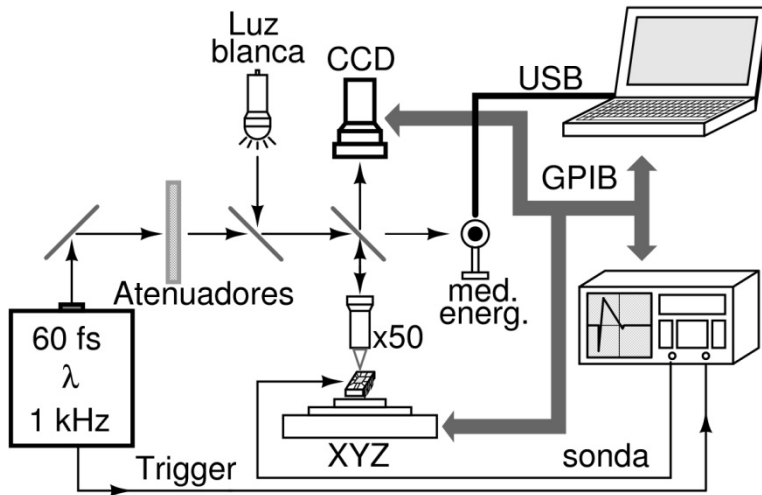


Fig. 1. Izda: Esquema del montaje experimental de ensayos definido. Dcha: Imágenes reales del sistema.

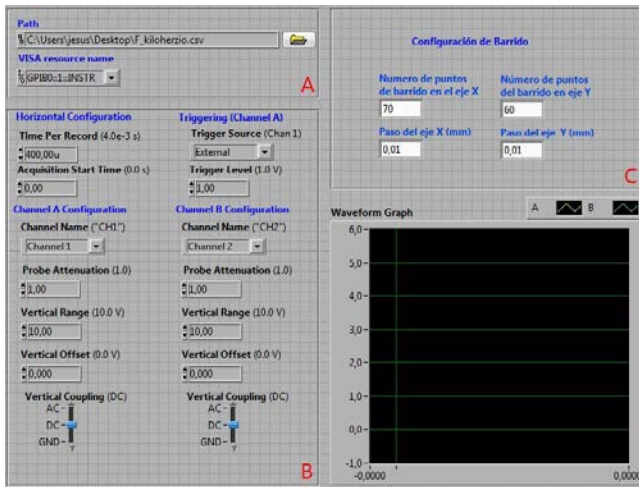


Fig. 2. Interfaz del programa de control durante el proceso de caracterización de componentes en línea. Esta experiencia se utilizó para dispositivos analógicos.

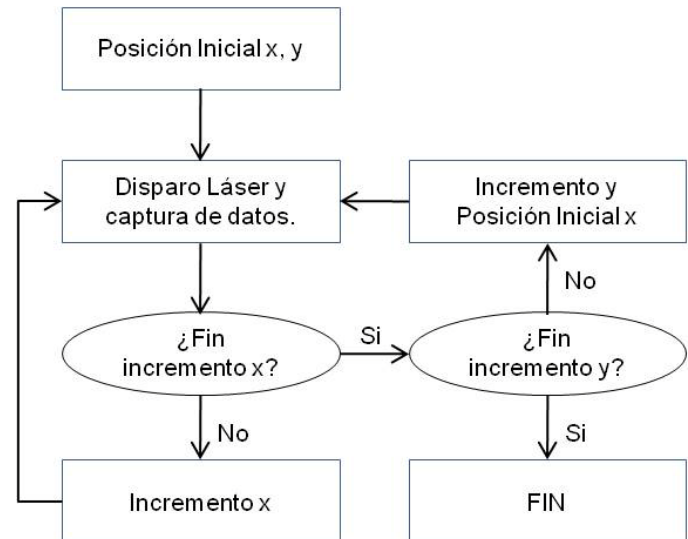


Fig. 3. Diagrama de estados programado en Labview para realizar el barrido del dispositivo completo.

órdenes. Por tanto, la estimación de la duración de la medida sería de 1 hora y 50 minutos aproximadamente.

Obviamente, en este intervalo de tiempo se producen más de 2000 transitorios adicionales que no son registrados por el sistema. Sin embargo, este hecho no es un grave problema pues los transitorios son repetibles y, sobre todo, no estropean el dispositivo pues en ningún caso se llega a la energía de ablación del silicio que podría dañar físicamente el componente.

A modo de ilustración, en Fig. 4, se puede observar uno de los puntos de disparo sobre el circuito integrado. La imagen corresponde a la captura de imagen que se obtiene a través de la cámara CCD para infrarrojo. El circuito integrado se observa debido a que la muestra está también iluminada mediante luz blanca a través del objetivo de microscopio. Como se observa, la luz blanca entra de forma perpendicular a la muestra. En otro caso, la imagen la obtendríamos

distorsionada. Debe indicarse que el programa que controla la cámara no está integrado en el programa principal para no sobrecargar la memoria RAM del ordenador durante la toma de datos.

Se observó que la duración del transitorio inducido por el láser era del orden de 10-100 microsegundos y por tanto, no aparecía solapamiento de pulsos en las trazas de datos almacenadas. Por tanto, la sincronización de la captura de datos con la señal de "trigger" proveniente del láser, también a 1kHz, sirve para sincronizar la captura de datos y los transitorios sin solapamiento de pulsos en las formas de onda.

Finalmente, es importante demostrar que el sistema funciona de forma efectiva. Pongamos algunos ejemplos prácticos. Fig. 5 muestra la salida obtenida en la salida de un amplificador operacional típico, el LM124, cuando se golpea con el láser un transistor específico de la etapa de ganancia. Estos transitorios se han descrito en la literatura sobre el tema en los ensayos

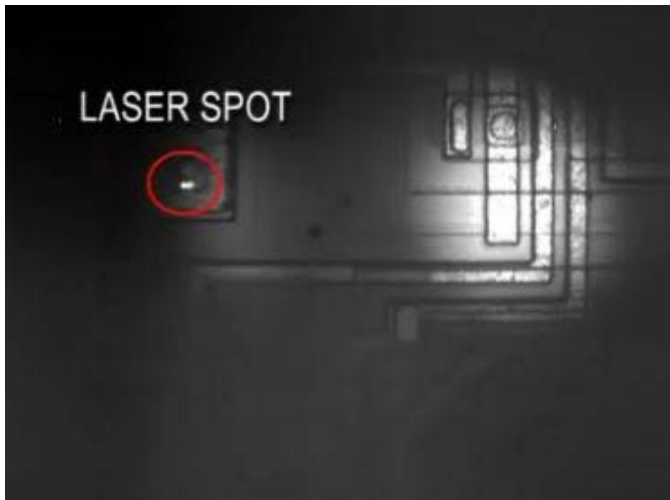


Fig. 4. Imagen capturada por la cámara CCD en uno de los puntos de disparo láser en la superficie del circuito integrado.

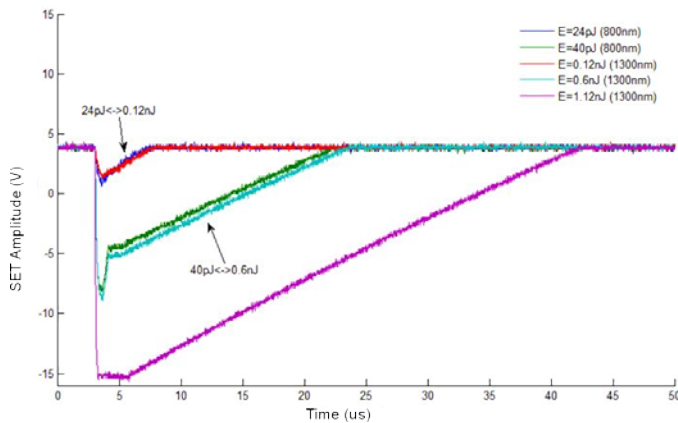


Fig. 5. Ejemplo de transitorios obtenidos mediante la técnica de un único fotón (SPA) y doble fotón (TPA) [6] a diferentes energías de pulso y a una frecuencia de pulsos de 1kHz. Dispositivo LM124.

realizados con iones lo que demuestra el correcto funcionamiento del sistema de medida.

Otro ejemplo de esta aplicación es la capacidad de barridos XY a lo largo de toda la superficie del circuito integrado. Fig. 6 muestra el mapa de sensibilidad de un comparador de tensión LM111. Se puede observar que solo hay unas pocas zonas donde el impacto de un láser puede inducir un transitorio en estas condiciones de polarización. Tras comparar el *lay-out* del componente con el esquema de la hoja de características del componente, se identificaron las zonas como transistores específicos del par diferencial de entrada así como de las etapas de alimentación.

III. FUTURO DESARROLLO

El sistema descrito en este artículo ha podido ser utilizado en experimentos que han conducido a la obtención de resultados distribuidos en publicaciones científicas. Sin

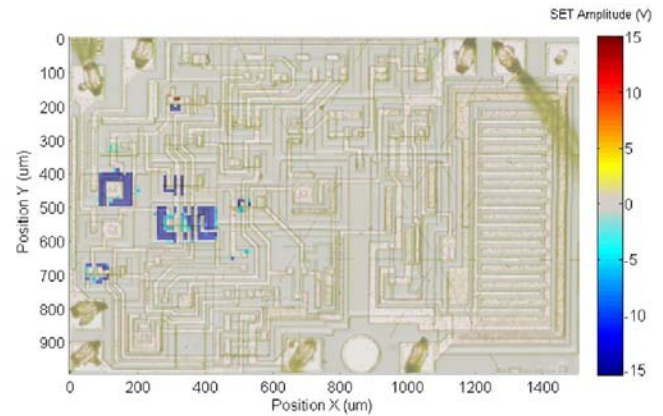


Fig. 6. Ejemplo de mapa de sensibilidad de un comparador de tensión LM111 alimentado con tensiones de ± 15 V, con una diferencia de tensiones de entrada de 0 V y con una energía típica de láser de 40 pJ por pulso a 800 nm de longitud de onda. No debe superarse los 100 pJ por pulso para no producir ablación.

embargo, está en permanente mejora, siendo algunos de los objetivos los siguientes puntos:

- *Disparo único:* El hecho de que el láser tenga una frecuencia de disparo de 1 kHz dificulta el estudio de sistemas digitales en los que se pueden acumular los errores en los registros de memoria. El sistema debe solucionar este problema incorporando un obturador controlable de manera automática.

- *Medida de la energía del láser:* La energía del láser es medida antes y después de la experiencia. Para mayor seguridad, sería necesario incorporar un sistema de lectura automática a través de un medio digital.

- *Control automático de tensiones de alimentación y de entrada:* Otra de las mejoras factibles que se encuentran en desarrollo tiene que ver con la posibilidad de modificar de manera automática las tensiones de alimentación y de entrada. Por ello, sería necesario incorporar fuentes controlables digitalmente por GPIB, con mucha precisión en el caso de la tensión de entrada.

- *Análisis dinámico:* Las pruebas realizadas hasta la fecha suponían que la entrada aplicada a los dispositivos era constante. Sin embargo, se sabe que los transitorios pueden depender de la frecuencia de trabajo en algunos casos. Por ello, sería necesario introducir modificaciones al programa de control que permitiera examinar una señal variable en el tipo y encontrar el transitorio como una alteración de la salida respecto a la forma de onda prevista.

IV. CONCLUSIÓN

Se ha demostrado la posibilidad de construir un sistema automático para emular sucesos aislados en dispositivos analógicos por medio de un láser pulsado. Este sistema ha sido

capaz de obtener resultados comparables con los mostrados en la literatura y que fueron obtenidos con haces de iones. Por otra parte, está previsto introducir mejoras en el sistema para aplicarlo a otra serie de experimentos más complejos como la evaluación de sistemas digitales o analógicos de forma dinámica.

REFERENCES

- [1] R. Harboe-Sorensen, F. X. Guerre, H. Constans, J. Van Dooren, G. Berger and W. Hajdas, "Single event transient characterisation of analog IC's for ESA's satellites," *Radiation and Its Effects on Components and Systems*, 1999. RADECS 99. 1999 Fifth European Conference on , vol., no., pp.573-581, 1999.
- [2] R. Harboe-Sorensen, *et al*, "Observation and analysis of Single Event Effects on-board the SOHO satellite," *Radiation and Its Effects on Components and Systems*, 2001. 6th European Conference on , vol., no., pp. 37- 43, 10-14 Sept. 2001
- [3] A. Johnston, S. Thompson, R. Baumann, H. Barnaby, S. Buchner and D. McMorrow, "2005 IEEE NSREC Nuclear and Space Radiaciton Effects Conference Short Course Notebook", *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2005
- [4] B. E. Pritchard, G. M. Swift, A. H. Johnston. "Radiation Effects Predicted, Observed, and Compared for Spacecraft Systems", *IEEE NSREC 2002 Data Workshop Proceedings*, 2002: pp. 7-17.
- [5] V. Pouget, D. Lewis, H. Lapuyade, R. Briand, P. Fouillat, L. Sarger, M. -C. Calvet, "Validation of radiation hardened designs by pulsed laser testing and SPICE analysis", *Microelectronics Reliability*, Volume 39, Issues 6-7, *European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis*, June-July 1999, pp. 931-935.
- [6] D. McMorrow, W. T. Lotshaw, J. S. Melinger, S. Buchner, and R. L. Pease, "Subbandgap laser-induced single event effects: carrier generation via two-photon absorption ", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 49, pp.3002 - 3008, Dec. 2002.